



# Avaliação de Sustentabilidade da Produção de Etanol no Brasil: Um Modelo em Dinâmica de Sistemas

Arnoldo Jose de Hoyos Guevara<sup>†</sup>

*PUC - São Paulo*

Orlando Roque da Silva<sup>Ω</sup>

*Centro Universitário FMU*

Haroldo Lhou Hasegawa<sup>Υ</sup>

*Universidade de Sorocaba*

Délvio Venanzi\*

*UNISO*

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi apresentar a formalização de um modelo dinâmico de avaliação abordando a sustentabilidade da produção do etanol no Brasil. Foram analisados os ambientes externos e os cenários necessários para uma compreensão mais profunda da relação de causa e efeito, laços causais e diagramas de fluxos e estoques de modo a compreender os problemas envolvidos dentro de uma sistemática conhecida como ciência de design. O comportamento de sistemas complexos, tais como as cadeias produtivas, que possuem características inerentes as quais permitem a análise utilizando-se do conceito de dinâmica de sistemas e a ciência do design. Tal abordagem se baseia em conceitos matemáticos e físicos de processos não lineares consolidadas em aplicações de simulação em engenharia principalmente no que tange à representação de modelos de cadeias de produção.

**Palavras-chave:** Etanol; Sistemas dinâmicos; Sustentabilidade.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. PRODUÇÃO DE ETANOL NO BRASIL

A oferta brasileira de etanol cresceu no período 1994-1998, quando um período de crise teve início devido aos altos níveis de estoque e à redução no mercado doméstico. Durante esse período, o preço do açúcar no mercado internacional aumentou e, consequentemente, a oferta de etanol no mercado interno despencou. Com a queda na demanda, a quota dos veículos movidos a etanol diminuiu de 75,5% em 1985 para 0,06% em 1997, com elevados custos financeiros e fiscais. Esse cenário foi revertido desde 2001, quando motores a etanol começaram a ser produzidos novamente. Essa tendência deu origem ao surgimento de uma nova indústria de etanol desde 2003, quando entraram em cena os motores flex.

A indústria de açúcar brasileiro e etanol reuniu no biênio 2012/2013, 602 milhões de toneladas de cana de açúcar por 8,5 milhões de hectares. A produção registrou 38,8 milhões de toneladas de açúcar e 23,9 bilhões de litros de etanol. Isso representa uma quota de 41,8% na produção total mundial de etanol, estimado em 49 bilhões de litros. Espera-se que o Brasil dobre a área de cultivo de cana de açúcar nos próximos vinte anos, atingindo uma produção de 40 bilhões de litros de etanol.

#### Autor correspondente:

<sup>†</sup> PUC - São Paulo.

E-mail: [dehoyos@pucsp.br](mailto:dehoyos@pucsp.br)

<sup>Ω</sup> Centro Universitário FMU.

E-mail: [orlando.silva@fmu.br](mailto:orlando.silva@fmu.br)

<sup>Υ</sup> Universidade de Sorocaba

E-mail: [haroldo.hasegawa@prof.uniso.br](mailto:haroldo.hasegawa@prof.uniso.br)

\* UNISO.

E-mail: [delvio.venanzi@prof.uniso.br](mailto:delvio.venanzi@prof.uniso.br)

Recebido: 02/02/2016.

Revisado: 06/04/2016.

Aceito: 06/04/2016.

Publicado Online em: 01/12/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15728/bbr.2017.14.4.5>



This article has a Creative Commons License - Attribution 3.0 Not Adapted.

Apesar do cenário acima, o etanol produzido a partir da cana de açúcar tornou-se recentemente objeto de intensos ataques por parte das autoridades europeias. Eles veem na expansão da produção de biocombustíveis em todo o mundo a razão para um aumento na inflação dos alimentos. A Organização das Nações Unidas (ONU) condenou os biocombustíveis, com a declaração do relator especial do Alto Comissariado de Direitos Humanos, que a produção em massa é um crime contra a humanidade devido a seu impacto sobre os preços mundiais de alimentos. De acordo com Oliveira (2009), por meio da expansão de biocombustíveis permanece a seguinte questão: quais são as consequências para a produção de alimentos no Brasil, com a expansão da colheita de cana nos próximos 20 anos?

Os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), entre 1990 e 2012, mostram que a redução da produção de alimentos, imposta pela expansão da área de cana de açúcar plantada, cresceu nesse período, mais de 2,7 milhões de hectares. Tomando os municípios que apresentaram a expansão de mais de 500 hectares de cana no período, verificou-se que houve redução de 261 mil hectares de feijão e 340 mil hectares de arroz. Essa área reduzida poderia produzir 400.000 toneladas de feijão, ou seja, 12% da produção nacional, e um milhão de toneladas de arroz, o equivalente a 9% do total do país. Além disso, nesses municípios a produção de leite foi reduzida para 460 milhões de litros, e a quantidade de gado foi reduzida em mais de 4,5 milhões.

No estado de São Paulo, em 2006/2007, foram cultivados 3,8 milhões de hectares de cana de açúcar, representando 61% da área total nacional desse produto. No mesmo ano, ele produziu 61,5% de etanol (10,9 bilhões de litros), 65,8% de açúcar e 61% de cana de açúcar da produção total nacional. Em 2007/2008, a perspectiva era uma produção nacional de 20,5 bilhões de litros, e São Paulo participaria com 12,7 bilhões de litros, cerca de 62% do total. Em 2015, sua participação diminuiu para 54,9%, devido à disponibilidade e ao custo mais baixo da terra em outra região. Essa desconcentração dependerá da logística centro-oeste para o transporte do produto, como o alcoolduto de etanol (aqui não é melhor deixar alcoolduto ou dutos de Etanol? Crédito que alcoolduto de etanol fica meio redundante) da Transpetro de Senador Canhedo, GO, que liga Guararema, e de lá, ligando o porto de São Sebastião, no estado de São Paulo.

A oferta mundial de etanol de cana de açúcar está em expansão, e outras nações estão despertando para esse combustível renovável de menor custo, enquanto os Estados Unidos estão aumentando a produção de etanol de milho, com um custo mais elevado. No entanto, os impulsionadores desse processo de abastecimento global do mercado está muito mais relacionado ao montante de investimentos em ciência e tecnologia para as próximas gerações de produção de etanol a partir de muitas outras fontes de biomassa. Portanto, a vantagem competitiva de países que apenas confiam na disponibilidade de terra e luz do sol e na tecnologia do etanol atuais não é garantida no longo prazo.

No entanto, o papel de transferência da tecnologia de processamento de cana de açúcar para biocombustíveis ainda tem o argumento importante da criação de um mercado internacional de abastecimento de etanol, diminuindo os riscos para os operadores e os utilizadores. No entanto, como mostra a história, os mercados globais de muitas outras commodities do agronegócio vêm sendo desenvolvidas ao longo dos últimos séculos, e os problemas de abastecimento (falta e excesso), o protecionismo e as crises ainda acontecem. Mas o aumento de uma fonte renovável de energia será inexorável, como os investimentos na produção, dos agentes globais do agronegócio: comerciantes, operadores logísticos, empresas de moagem (*Mill Corporation*), referentes à aquisição de moinhos, *joint ventures* e estratégias de fusão, obtendo vantagens com conhecimento, oferta, economias de escala, poder de mercado, reduções de custos de transação e gestão de riscos. Como resultado dessa dinâmica, a produção nacional brasileira para o combustível hidratado e etanol desidratado em 2006 foi de 19 bilhões de litros. O consumo como combustível para veículos foi

composto de 14 bilhões de litros, 3,6 bilhões de litros foram exportados e 1,4 bilhões de litros foram para uso industrial doméstico.

Apesar da produção de etanol ser estudada em diversas universidades, instituições de pesquisa, agências governamentais e no setor privado, as características de distribuição e produção regional não foram suficientemente abordadas na pesquisa, mas são essenciais para avaliar os riscos e as consequências de tal expansão no meio ambiente e na produção de alimentos.

O cenário acima associado ao fato de que as simulações tornam possível observar os fatores de risco de forma mais clara do que é possível em escala real, dada a complexidade dos processos de produção-distribuição, justifica o desenvolvimento de um modelo dinâmico de produção com base no sistema dinâmico de etanol. Nesse microcosmo simulado torna-se possível isolar os efeitos e as causas mais facilmente do que quando envolvido pelas complexidades do mundo real. (WARREN, 2008).

## 1.2. ANÁLISE PROSPECTIVA DE POLÍTICA PÚBLICA

A literatura de análise prospectiva descreve as aplicações para a ciência, a tecnologia e o planejamento de inovação, as estratégias de negócios empresariais e as políticas governamentais. O caminho metodológico discutido nesta seção descreve uma estrutura de ampla gama de técnicas, destacando as ligações entre eles, que foram utilizadas no processo contínuo em potencial, que será descrito no final desta seção.

Estudos prospectivos visam à obtenção de informações a fim de fornecer informações para ajudar a decidir sobre eventos futuros, antecipar e compreender os mecanismos, as potencialidades, a evolução, as características e efeitos dos processos de inovação, e a mudança institucional e tecnológica (COELHO, 2003; ZACKIEWICZ e SALLES-FILHO, 2001). Os Exercícios prospectivos tecnológicos e suas ferramentas de análise de variedades podem ser instrumentos importantes para a focalização das necessidades primárias e identificação das lacunas de conhecimento a serem preenchidas por instituições de pesquisa e, portanto, sua alocação de recursos. A previsão é um processo multidimensional para entender os futuros mecanismos de longo prazo que devem ser considerados para formulações de política, estratégia, planejamento e decisão (COATES et al, 2001). Este utiliza métodos qualitativos e quantitativos para monitoramento dos sinais e indicadores de tendência de uma questão em evolução.

Coelho (2003) considera que os métodos intuitivos baseados na avaliação do especialista são mais adequados e cobrem uma gama mais extensa de aplicações nessa abordagem. Embora a previsão por si não defina políticas, esta pode desenvolver visões sobre como o futuro poderá ser construído, e é mais indicado quando aplicada a análise de políticas e suas implicações, ajudando as políticas a serem mais robustas e flexíveis na sua implementação de acordo com a linha do tempo e as variáveis que podem promover mudanças. No entanto, esses processos de previsões estão cada vez mais complexos e novas técnicas estão sendo aplicadas para diminuir a complexidade nas previsões, através da construção de roteiros (SARITAS e ONER, 2004).

*Roadmapping* é uma estrutura de planejamento (PHAAL, FARRUKH & PROBERT, 2004) utilizada por uma ampla gama de aplicações de uso, incluindo o apoio estratégico e planejamento intraorganizacional de longo alcance, interorganizações (indústria), desde a ciência e a tecnologia do setor privado orientada às empresas estatais e agências de política governamental. É uma abordagem sistêmica utilizada por Garcia e Bray, (1997) como um instrumento de monitoramento ao vivo que fornece uma ferramenta para vincular o ambiente de verificação com o cenário de planejamento (SCHOEMAKER, 1995) e outras técnicas em perspectiva. Este também vincula a evolução dos condutores e a inter-relação nos mercados, produtos, tecnologias, conhecimentos, recursos e desenvolvimento com a

implementação de políticas em uma linha do tempo. Um processo político de *roadmapping* pode lidar com diferentes níveis de futuros condutores: Transições macrossociotécnicas e mudanças institucionais, organização industrial, interação da cadeia de suprimentos e organização de ciência. Um *roadmap* pode vincular esses níveis de análise de ameaças de sustentabilidade do negócio/indústria, as oportunidades e a agenda de formulação de políticas. Ele também vincula a análise do impacto e classifica os caminhos elegíveis de acordo com a futura evolução.

No caso de formulação de políticas públicas e processos de mapeamento de área, os fluxos de conhecimento são de dois tipos: um processo de “atração”, em que os requisitos de conhecimento e pesquisa são identificados, e os recursos são alocados para uma abordagem de resolução de problemas de longo prazo; outro é um processo “impulsionador” onde o conhecimento e as capacidades são alocados para influenciar e estabelecer o processo de formulação de políticas e conteúdo para uma abordagem de resolução de problemas de curto prazo. Porter et al (1991) classificam as famílias dos métodos potenciais que são descritos de acordo com o seu refinamento, disponibilidade de informações e tratamento. A criatividade é uma técnica para interação de conhecimento e geração de um grande volume de novas ideias.

O painel do especialista detecta o conhecimento tácito e os sinais fracos, portanto, traz ambiguidades e é usado quando a informação não pode ser quantificada ou modelada. Os sistemas de monitoramento e inteligência são fontes de informações pré-organizadas para identificar tendências críticas e eventos, suas relações, oportunidades e ameaças. No entanto, fornecem uma grande quantidade de informações de várias fontes, e quando mal administrada, pode resultar em excesso de informações não sistematizada, não analisada e não seletiva. O cenário visa construir imagens futuras alternativas, analisando as tendências dominantes e desfazer possibilidades, em uma abordagem exploratória ou normativa. A avaliação e a decisão são métodos para diminuir a complexidade de incertezas quando múltiplos interesses e dimensões estão sendo considerados.

Os métodos participativos tornaram-se a chave dos processos potenciais devido à aplicação da sua abordagem democrática implícita, conferindo legitimidade social para os resultados e apresentam a capacidade de envolver uma diversidade de participantes, criando arranjos coletivos, buscando decisão harmônica e processo de implementação. Outro aspecto importante é o fato de que a construção de conhecimento tem mais eficácia quando há interação dos conhecimentos dispersos entre os participantes de um processo de inovação e as informações estratégicas são difundidas entre as pessoas-chave envolvidas. Devido a essas características, estes têm um apelo interessante sobre a gestão de metodologia. A avaliação do impacto pode ser complementar quando essa atividade é baseada em cenários construídos pela fase prospectiva.

### 1.3. APLICAÇÃO DA DINÂMICA DO SISTEMA PARA ESTUDOS DE SUSTENTABILIDADE

A dinâmica do sistema é uma abordagem para analisar o comportamento de sistemas complexos, tais como as cadeias de suprimento, considerando estritamente as características inerentes. Essa abordagem é baseada em conceitos matemáticos de processos não lineares desenvolvidos em matemática e física e consolidados na engenharia. Os conceitos inerentes à metodologia ajudam na criação de modelos matemáticos que representam a cadeia produtiva e podem diagnosticar pontos problemáticos na estrutura da cadeia utilizando simulações computadorizadas que empregam uma representação fácil de compreender.

A descoberta de que os modelos mentais influenciam a forma como as pessoas veem a realidade, sem dúvida, dirigiu a utilização da dinâmica do sistema mais pela explicação de pensar sobre a realidade do que a obtenção de respostas numéricas para problemas bem

estruturados (DAVIES, 1996). Neste sentido, o mais importante na dinâmica do sistema do uso do processo é produzir ideias durante o processo de modelagem, ideia fortemente identificada para a criação de conhecimento e percepção de novas oportunidades, de acordo com De Geus (1994), um ex executivo da Shell. Esse fato coloca a dinâmica do sistema de uma perspectiva diferente de métodos analíticos e econométricos tradicionais, colocando-o no coração da prática e da teoria da aprendizagem organizacional, como postulado por Senge (1990) em seu livro “A quinta disciplina”.

Agarwal e Shankar (2005, 2008) argumentam que, devido à relação causal existente no sistema de produção, a abordagem dos sistemas dinâmicos é bem adequada para capturar o impacto do desempenho dinâmico das variáveis na integração e a capacidade de resposta do sistema de produção em um determinado intervalo de tempo.

Pesquisas sobre sistemas dinâmicos aplicados a estudos de sustentabilidade são divididos em três grupos principais:

- i) Pesquisas que contribuem para a construção de teorias sobre sustentabilidade;
- ii) Pesquisas que utilizam a dinâmica do sistema na resolução de problemas de sustentabilidade;
- iii) Pesquisas que trabalham no desenvolvimento e aperfeiçoamento de ferramentas de modelagem em sustentabilidade.

A pesquisa de Eberleinand Chichakly (2013) é um exemplo típico da utilização dos sistemas dinâmicos na construção da teoria. Ao estudar a indústria de serviços de TI, Minis et al (2010) propuseram uma nova teoria para os ciclos virtuosos e viciosos, usando um modelo causal exploratório para descrever a inter-relação dos fatores-chave de sucesso.

Morecroft (2007) utiliza os sistemas dinâmicos para resolver os problemas de estratégia através do desenvolvimento de um modelo de gestão da estratégia para simular diversos cenários. Cha, Pingry e Thatchen (2008) investigaram a ampliação da demanda nas cadeias de suprimento.

As pesquisas sobre o desenvolvimento e aperfeiçoamento de ferramentas de modelagem em sistemas dinâmicos são exemplo no trabalho de Howick e Eden (2004) que estudaram a natureza das descontinuidades na modelagem de dinâmica do sistema do projeto interrompido. Outro artigo nessa linha é o de Arango e Osório (2009), que consideram também a capacidade técnica, organizacional inerente ao modelo de dinâmica dos sistemas para o mercado mundial de café. A dinâmica do sistema oferece um quadro adequado para acomodar vários elementos envolvidos e as relações entre eles, para integrá-los diretamente em um modelo que mostra de forma clara os pontos fracos das atuais políticas e as possibilidades de mudança.

## 2. PROCEDIMENTOS E MÉTODOS DE PESQUISA

### 2.1. OBJETIVOS DA PESQUISA

Os principais objetivos deste estudo são:

1. Identificar as principais variáveis, fluxos e estoques e as relações causais dos processos de produção de cana de açúcar, açúcar e etanol;
2. Explorar como a produção de etanol no Brasil está aumentando e como essa produção afeta a produção de alimentos;
3. Aplicar a modelagem e simulação em dinâmica de sistemas no sistema de produção de etanol.

O conhecimento gerado por este estudo permite uma discussão mais aprofundada dos impactos da produção de etanol, tanto no ambiente como na produção de alimentos, além de ser a base para o desenvolvimento das equações que descrevem o comportamento de variáveis e ações que estão na raiz do processo de simulação. O estudo concluiu que iniciar com a identificação e caracterização dos elementos para modelar e trabalhar com



---

a simulação de diferentes cenários é melhor para entender o grau de sustentabilidade da produção de etanol.

BBR

14,4

Assim, o principal objetivo deste trabalho é apresentar a formalização do modelo dinâmico de avaliação da sustentabilidade da produção do etanol brasileiro, suas fronteiras (ambiente externo) e os cenários necessários para uma compreensão mais profunda de causa e efeito, laços causais e diagramas de fluxos e estoques.

440

---

## 2.2. MÉTODOS

O quadro metodológico de uma pesquisa compreende a seleção e justificação de um método que é capaz de responder ao problema de pesquisa formulado para ser avaliado pela comunidade científica e demonstrar os procedimentos que tornam robustos os resultados da investigação. Esses passos lógicos não devem ser vistos como obstáculos à realização da pesquisa, mas como procedimentos necessários para assegurar a imparcialidade, precisão na condução do trabalho e a confiabilidade dos resultados. Assim, esta pesquisa adota a metodologia de ciência do design que visou desenvolver e construir um artefato (modelo dinâmico) para comprovar a teoria pela aplicação de métodos e dados robustos a fim de obter modelos que simulam com maior exatidão o ambiente pesquisado permitindo uma análise realística. Para tanto a precisão é.... Como esta pesquisa pretende desenvolver um artefato (modelo dinâmico) para concepção da ciência provada para ser uma metodologia adequada, não só para lidar com a construção de um artefato, mas também requer a aplicação de métodos rigorosos, tanto na construção quanto na avaliação do design de produto. A precisão é frequentemente medida pela aderência da pesquisa a uma adequada coleta de dados e à análise técnica correta.

Para identificar as variáveis do modelo e as relações causais, foi realizada uma entrevista nos meses de agosto e setembro de 2014, com um grupo de produtores de etanol do arranjo produtivo local do álcool (APLA) em Piracicaba, SP. A análise dessas entrevistas concluiu o estágio de sensibilização no que se refere à compreensão dos problemas envolvidos, de acordo com a metodologia de ciências de design. Romme e Damen (2007) argumentam que pode ser necessário compreender as questões a partir de uma perspectiva mais ampla, em que os sistemas de pensamento (ANDRADE et al., 2006), por exemplo, poderiam trazer uma contribuição significativa.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, vamos discutir a visão geral do modelo, o diagrama de laços causais, o diagrama de estoque e fluxos de produção de etanol e cenários de simulação. Ele é utilizado para a ferramenta de modelagem da dinâmica do sistema visual Vensim®, software fornecido pela empresa Ventana System Inc., que permite ao analista ligar palavras com setas que representam as relações entre as variáveis como relações causais. O diagrama de estoque e fluxo em Vensim® consiste em variáveis de fluxo de caixa ou constantes que representam ações ou acumulações. O editor de equações utiliza essa informação para concluir o processo de modelagem.

### 3.1. VISÃO GERAL DO MODELO

No modelo, a produção de cana é considerada como a mais importante fonte de produção, enquanto a produção de etanol e de açúcar é o segundo nível, e a geração de resíduos sólidos e as águas residuais são o terceiro nível. A figura 1 é uma representação esquemática dos fluxos do produto e informação de inventário associadas com a produção de etanol. O modelo não inclui a produção de etanol de segunda geração, a partir do bagaço de cana

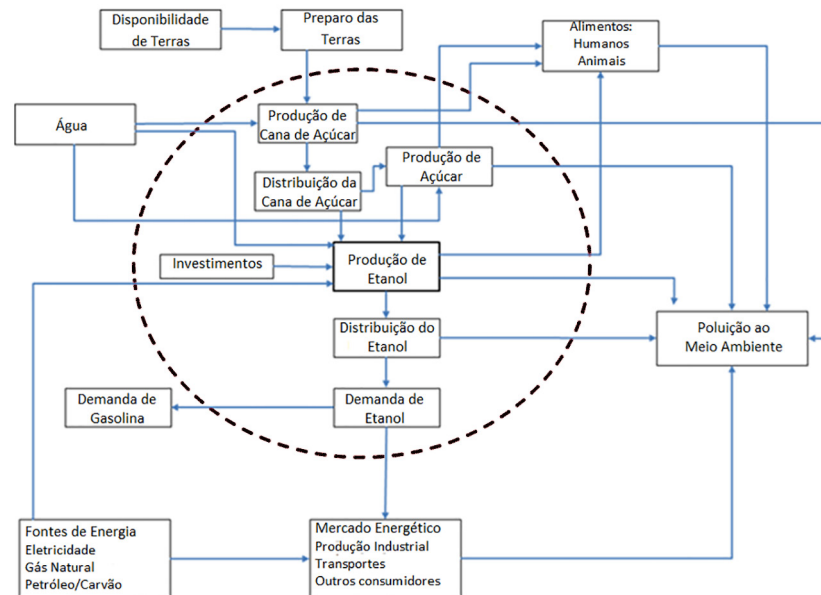


Figura 1. Visão geral do modelo de produção do etanol.

de açúcar, porque a quantidade de etanol produzida com essa tecnologia é pequena e não influencia os dados para a simulação.

A disponibilidade de terra para os plantios tratados como sendo compartilhados entre a produção de cana de açúcar e alimentos, ou seja, é considerada uma disponibilidade finita de terras de modo que um aumento no plantio de cana implica a redução da produção de alimentos. O nível de produtividade das culturas plantadas influencia esses aumentos e diminuições. A quantidade de etanol a ser produzida é influenciada pela produção de açúcar, que compete no consumo de açúcar e recursos produtivos, bem como pelo nível de consumo de outros tipos de combustível, como gasolina e gás natural veicular, além de sofrer a influência de investimentos em infraestruturas de produção e distribuição.

### 3.2. MODELAGEM

A modelagem de um sistema utilizando a dinâmica do sistema é interativa e é um processo contínuo de formulação de hipóteses, teste e revisão dos modelos mentais formais. De acordo com Sterman (2000), no processo de modelagem alguns passos devem ser considerados, tais como:

1. Articulação do Problema - Qual é o problema? Por que este problema? Quais são as principais variáveis e conceitos que devem ser considerados? Qual o tempo a ser considerado para o futuro? Quais são os comportamentos históricos dos conceitos e variáveis-chave?
2. Hipótese da Dinâmica de Formulação - Produzir hipóteses iniciais, formular hipóteses para explicar a dinâmica e as consequências da estrutura de feedback endógena, desenvolver mapas de estruturas causais baseadas em suposições iniciais, variáveis-chave e outros dados disponíveis;
3. Modelo de Simulação de Formulação - Especificação das regras de estrutura e de decisão, estimativa de parâmetros, relações comportamentais e condições iniciais, testes de estabilidade com os objetivos e limites;
4. Teste - O modelo produz de maneira adequada o comportamento proposto? O modelo se comporta de forma realista quando submetido a condições extremas? Qual é a sensibilidade do modelo?

- 
5. Novas políticas e evolução - Que condições ambientais podem surgir? Que novas decisões, estratégias e estruturas podem ser experimentadas no mundo real? Como esses novos cenários no modelo podem ser representados? Qual é a robustez das políticas recomendadas para diferentes cenários, considerando as incertezas? Como as políticas interagem? Há ações comuns ou respostas compensatórias?

BBR  
14,4  
442

---

### 3.3. SIMULAÇÃO

A simulação é uma das mais poderosas ferramentas de análise disponíveis para as pessoas envolvidas no design ou na operação de sistemas ou processos complexos. Em um mundo cada vez mais competitivo, a simulação tornou-se uma poderosa ferramenta para o planejamento, projeto e controle do sistema. Deve sempre ser lembrada como o último recurso; ela é agora vista como uma metodologia de resolução de problemas indispensáveis para engenheiros, designers e gestores. Simular é imaginar a essência sem a realidade. Uma melhor definição para a simulação é: o processo de concepção de um modelo de um sistema real para conduzir experimentos com esse modelo, com a finalidade de compreender o comportamento e/ou avaliar várias estratégias para sua operação. Portanto, a simulação pode ser considerada como a construção de um modelo para uso experimental permitindo a representação de um grupo de objetos ou ideias que permita traçar paralelos ou representar uma dada entidade ou situação. Por fim, um modelo é utilizado para representar o conjunto ou coleção de elementos relacionados que trabalham juntos para completar um objetivo definido.

Do ponto de vista das dinâmicas do sistema, qualquer sistema natural ou artificial pode ser descrito através de uma linguagem composta por quatro elementos: estoques (níveis), que representam acumulações de um recurso; fluxos, os quais são as atividades que produzem o crescimento ou a redução de estoques; conversores que processam as informações sobre os estoques e fluxos ou representam fontes de informação externa ao sistema; conectores que são elementos de acoplamento de informações que descrevem a relação entre estoques, fluxos e conversores. A fim de proporcionar um comportamento do modelo de simulação, é suficiente utilizar os recursos disponíveis no software de dinâmica do sistema para definir o relacionamento e o valor de cada variável no tempo zero da simulação.

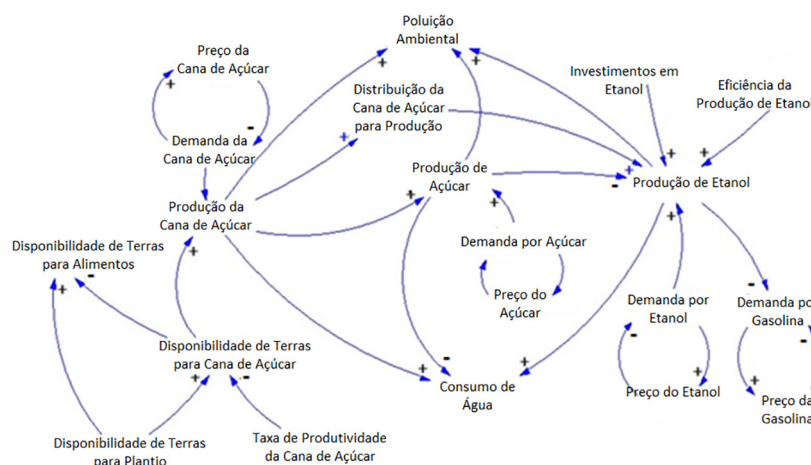
From the perspective of system dynamics, any natural or artificial system, can be described through a language composed of four elements: stocks (levels), which represent accumulations of a resource; flows, which are the activities that produce growth or reduction of inventories; converters that process the information regarding the stocks and flows or represent sources of external information to the system; connectors which are coupling elements of information describing the relationship between stocks, flows and converters. In order to provide a simulation model behavior, it is sufficient to define the relationship and the value of each variable at time zero of the simulation, using for this the features available in the system dynamics software.

De acordo com Agarwal e Shankar (2005), o desempenho de uma cadeia de suprimento depende da integração dos seus parceiros comerciais e a capacidade de responder rapidamente às mudanças do mercado. Ao simular o modelo para avaliar a sustentabilidade da produção de etanol brasileiro espera-se avaliar o efeito da integração e velocidade de resposta às mudanças na sustentabilidade. A dinâmica das interações entre as variáveis relacionadas com a integração de causa e efeito e velocidade devem mostrar a importância do comportamento da sustentabilidade em diferentes cenários da produção de etanol (representam alterações de mercado que exigem respostas rápidas).



### 3.4. O DIAGRAMA DE LAÇO CAUSAL

Este diagrama mostra as interações e as relações entre a produção de etanol, a utilização da terra, o consumo de água, a produção de cana de açúcar e o açúcar. A figura 2 mostra o diagrama de laços causais do sistema de produção de etanol e os fatores de influência. O diagrama consiste em vários desvios que mostram, por exemplo, a produção de cana de açúcar, o preço da cana, os incentivos fiscais do governo, a demanda por etanol e os preços da gasolina que afetam a produção de etanol.



**Figura 2.** Modelo conceitual da produção de etanol.

Assim, um aumento na produção de etanol influencia a redução do preço que pode aumentar a demanda resultando no aumento do preço. Mas um aumento no preço reduz a demanda de etanol, portanto a polaridade negativa da seta de ligação. Caso exista uma redução no preço do etanol, haverá um aumento da demanda desse combustível seguido pelo fosso entre a sua procura e a oferta, respectivamente. Isso pode levar tanto a um aumento do investimento em etanol quanto na maior alocação de cana de açúcar para produzir. Uma seta fecha o ciclo de polaridade positiva uma vez que um aumento na locação de cana de açúcar para produzir etanol significa um aumento na produção desse combustível. Esse ciclo é um exemplo de um processo de autorreforço positivo.

No entanto, o ciclo seria impedido de aumentar os níveis de cada fator indefinidamente porque outros fatores, além do desvio, como a demanda por etanol, influenciam o seu preço. A demanda por gasolina também influencia a demanda por etanol.

Outro exemplo, um aumento no rendimento obtido com a produção e comercialização de etanol afeta positivamente novos investimentos para o aumento da produção de etanol e a alocação de açúcar para sua produção. O efeito disso é o aumento da produção de etanol e a diminuição do seu preço pelas forças de oferta e demanda. Um preço mais baixo pode reduzir a rentabilidade afetando os níveis de investimento. Esse subsistema tende a ser inerentemente instável se as forças de atuação não assumirem a condição de autorregulação.

A partir do diagrama de laços causais percebe-se que os fatores relevantes para o nível de produção de etanol como investimentos em produção, alocação da produção de cana e rentabilidade têm um grau de dependência em relação à eficiência da produção, o preço da produção de etanol e açúcar, a disponibilidade de terras para o plantio que afetam profundamente as necessidades de crescimento para a produção de alimentos e água, tornando-se insustentável nos níveis esperados.

### 3.5. DIAGRAMAS DE FLUXOS E ESTOQUES

As equações que demonstram a relação entre fatores serão construídas com base em dados de produção e de investimentos do setor de açúcar e álcool fornecidos pelo Departamento de Agricultura do Estado de São Paulo, pelo Conselho dos produtores de cana, açúcar e álcool do Estado de São Paulo e o Ministério da Agricultura.

modelo foi construído em quatro passos. O primeiro deles é o etanol de elemento focal e descreve a dinâmica da oferta e da procura, ou lidar com a produção, armazenamento e distribuição de etanol. A segunda etapa, de produção adicional, vem do modelo de produção de açúcar como um substituto de produto para a produção de etanol. A terceira etapa lida com a modelagem do consumo de água em várias fases e terras utilizadas para a produção de cana de açúcar e alimentos. A quarta etapa modela a dinâmica do capital, custos e investimentos. O período de previsão começa em 2016 e se estende até 2035. Com essas informações, é possível não só simular o comportamento dinâmico da produção de etanol, açúcar e cana de açúcar, bem como avaliar os impactos sobre o meio ambiente, produção e consumo de alimentos, de água, conforme ilustrado na Figura 3.

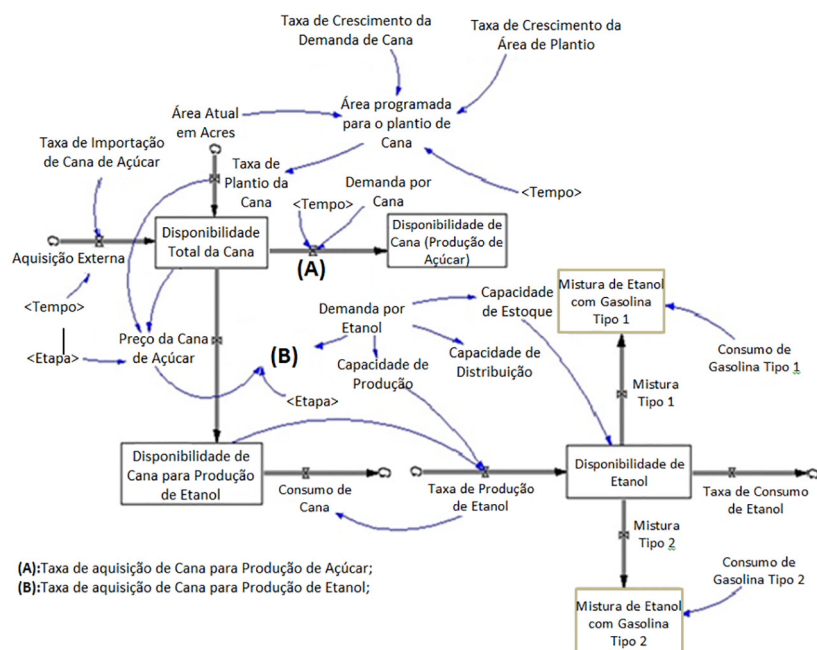


Figura 3. Diagramas de fluxos e estoques.

O diagrama de fluxo de inventário ameaça não só a demanda direta por etanol, mas também processos de demanda indiretos resultantes da mistura de etanol e gasolina que constitui um sistema de “produção puxada” em que puxar é a produção da demanda. Por outro lado, o sistema de colheita de cana é modelado como um sistema de “impulso” em que a cana é colhida e destinada ao processamento. No caso da demanda de açúcar ser menor do que o esperado, não há formação de um estoque de reserva para um curto período de tempo para mantê-lo atrasando o campo de colheita. Se a demanda é maior do que o esperado e as plantas têm capacidades de produção disponíveis, já que não há formação de estoques de reserva, pode-se trazer cana de açúcar de outros estados já que o preço de custo de transporte offset. Neste caso, a disponibilidade de açúcar seria o fator limitante para a produção de etanol.

A demanda de cana de açúcar para outros fins ou produção de açúcar e outras aplicações industriais é moldada de acordo com a projeção. A cana alocada para a produção de etanol depende da demanda, disponibilidade e preço que por sua vez dependem da taxa de aquisição de cana de açúcar para produção de etanol. Se a taxa de aquisição aumenta, o preço sobe e vice-versa.

O diagrama de fluxos e estoques também considera a demanda por etanol e o aumento da capacidade de produção nas plantas em proporção à quantidade de cana colhida, aumentando a demanda das áreas de cultivo, ocupando espaços antes destinados a culturas alimentares como arroz, feijão e milho. Os investimentos em melhorias na produtividade para obter a maior percentagem de sacarose, superior à margem de 9%, permitem o aumento da produção de etanol sem um aumento na mesma proporção de áreas plantadas.

Uma resposta que se espera com esse modelo de simulação de produção é avaliar quanto tempo a produção se mantém sustentável em face da crescente demanda por etanol.

### 3.6. MODELO COMPUTACIONAL

Uma vez modelada em Vensim®, os diagramas de desvio causal e gráficos de fluxos e estoques, o modelo de computador exigirá a introdução das equações que regem as relações causais das diferentes variáveis utilizadas e a definição de parâmetros de simulação, tais como unidade de tempo a ser utilizada e o horizonte de simulação.

A simulação irá trabalhar com um conjunto de cenários para avaliar o comportamento das variáveis e a sustentabilidade da produção. Na simulação de três cenários se aplica: um otimista, um pessimista e o mais provável. No primeiro cenário, presume-se que o primeiro período de 120 meses, mudanças na demanda e outros fatores têm taxas de crescimento estáveis. No segundo cenário, são introduzidas alterações na capacidade de produção nas fábricas, oscilando demanda por etanol, a escassez de água e as flutuações no preço do produto final, enquanto os outros fatores permanecem inalterados. No terceiro, é contemplado um cenário em que a demanda, a capacidade de produção, os preços e a produção de cana de açúcar tendem a se estabilizar na segunda metade do tempo de simulação.

O modelo de computador permite a interface com outras ferramentas, tais como sistemas de informação geográfica para mostrar as variações de áreas de plantio na forma de mapas, bem como promover e exportar dados para o processamento por outras ferramentas computacionais.

## 4. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Este artigo discute o uso de modelagem dinâmica de sistemas para modelar o problema da sustentabilidade do sistema de produção de etanol. A modelagem dinâmica de sistemas parece ser uma ferramenta útil para a criação de cenários para tais problemas. No entanto, este artigo considera algumas limitações à utilização dessa ferramenta específica para modelar a produção de etanol. Essas limitações são destacadas pelas ideias da teoria do sistema e pela ciência complexa (BOSSEL, 2007). Existem também limitações fundamentais para a correta previsão da sustentabilidade da produção de etanol nos próximos vinte anos, o que está claro por críticos do sistema de produção atual (DeTOMBE, 1994) e da teoria do caos (GLEICK, 1987). Essas restrições, no entanto, não anularam a importância das ferramentas de modelagem e simulação como ajuda na compreensão dos fenômenos dinâmicos, como a sustentabilidade.

## 5. CONCLUSÕES

Como Mendonça (2007) assinalou: “Não há muito tempo, os biocombustíveis eram dados como uma alternativa para salvar o planeta da acumulação de dióxido de carbono e a dependência excessiva do petróleo [...] foram o sinônimo de uma nova era, a era do limpo, onde as fontes de energias devem estar em sintonia com o meio ambiente [...]”. Mas, com tantas contradições, “[...] o vento mudou radicalmente. Biocombustíveis, quase de noite, está sendo considerado o vilão do planeta, responsável pela atual crise alimentar, pelo aumento dos preços.”

Este artigo apresentou a etapa de formalizar o modelo para avaliar a sustentabilidade da produção de etanol, suas fronteiras (ambiente externo) e soluções satisfatórias necessárias para estudar a produção de etanol brasileiro, seus efeitos sobre o meio ambiente, produção de alimentos e consumo de água e as tendências futuras em três diferentes cenários de simulação.

O modelo considera que a importância da independência energética não pode ser subestimada. Os preços do petróleo deverão crescer nos anos próximos, como as reservas estão esgotadas e o processo de extração de óleo remanescente torna-se mais caro. O etanol é um biocombustível que tem um excelente histórico de utilização e facilidade de produção relativa cuja matéria-prima básica é a cana de açúcar que pode ser facilmente cultivada. Como resultado, a produção de cana deve aumentar e mais plantas de processamento cultivadas.

Melhorias na tecnologia agrícola são esperadas para aumentar a produtividade por hectare. No entanto, esse aumento pode mitigar embora não impeça o aumento das áreas de cultivo de cana de açúcar e, conseqüentemente, trará reduções significativas na produção de alimentos com sérias implicações para o uso da cana de açúcar como uma forma alternativa de energia.

Os usos de modelagem permitem trabalhar com condições e cenários de simulação, em que são possíveis dadas as condições iniciais e a qualidade do modelo avaliar o que aconteceria com a indústria do etanol se os preços dele flutuassem em resposta à disponibilidade e fornecimento das fontes de energia alternativas para o transporte ou o que aconteceria com os preços dos alimentos se a demanda por etanol continuasse a crescer em demasia. O modelo deve ser capaz de permitir que a situação da pesquisa que muda na produção planejada de cana de açúcar, os preços da cana de açúcar, a capacidade, a demanda e outros fatores relevantes para a indústria que pode se tornar insustentável a continuidade dos negócios, seja pela falta de recursos hídricos ou pela necessidade de produção e alimentos para uma população crescente.

A indústria da cana de açúcar aumentou a produção de cana devido às pressões econômicas e o ao aumento da demanda por etanol produzido a partir dela, em grande parte, pela introdução de veículos que consomem o mercado de etanol. Por outro lado, o uso de tecnologias intensivas em unidades de produção, para aumentar a produtividade no campo, cria dependência de insumos externos comprometendo a sua sustentabilidade econômica. Projeções de mudanças climáticas indicam que os sistemas de produção de cana serão afetados pelo aumento das temperaturas e secas, entre outros eventos climáticos extremos.

O aumento na capacidade de resposta do sistema de produção de cana a condições climáticas adversas está a aumentar a resiliência do sistema. Já que ela é o potencial de um determinado arranjo de um sistema de produção para manter a sua estrutura e função quando ocorre uma perturbação, isto se tornou o maior desafio que o setor sucroalcooleiro enfrentará nos próximos anos. Explorar o conceito de resiliência permite compreender melhor e planejar ações para a sustentabilidade dos sistemas de produção da cana de açúcar. Nesse cenário, surgem os seguintes problemas: identificar os tipos de sistemas de produção, providenciar terrenos agrícolas para atender à crescente demanda por cana de açúcar, alta volatilidade dos preços, altos custos e eventos climáticos extremos; identificando a tecnologia de produção e corte de cana de açúcar, que contribuem para aumentar a resiliência dos sistemas de produção de cana para transtornos de mudanças do clima; identificando relevantes para os sistemas de produção de cana, distúrbios climáticos.

Os modelos são tão úteis quanto os dados utilizados na sua construção, compreendendo os analistas e a inclusão dos fatores importantes e relevantes. O Brasil é o líder de produção de biocombustíveis em larga escala, e manter essa liderança depende em grande parte da sustentabilidade da produção de etanol. Como tal, um modelo de avaliação da produção sustentável será útil para explorar as mudanças nas tendências de mercado, avaliação dos impactos das novas tecnologias de produção e melhoramento genético da cana de açúcar constituindo um instrumento de pesquisa para a avaliação dos futuros impactos da produção de biocombustíveis no Brasil.

## 6. REFERÊNCIAS

- AGARWAL, A., SHANKAR, R., Modeling supply chain performance in different market scenarios. Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Conference of the System Dynamics Society. Boston, USA: *The System Dynamics Society*. 2005.
- AGARWAL, A., SHANKAR, R., 2008. Modelling integration and responsiveness for supply chain. Proceedings of the International Conference of the System Dynamics Society. Athens, Greece: *The System Dynamics Society*. 2008.
- ANDRADE, A. L. et al., Pensamento Sistêmico: Caderno de Campo. *Bookman*, Porto Alegre. 2006.
- ARANGO, S., OSORIO, F. A. A system dynamics model for the world coffee market. The 27<sup>th</sup> International Conference of the System Dynamics Society, Albuquerque, New Mexico, USA: *System Dynamics Society*. 2009.
- BOSSEL, H. Systems and Models: complexity, dynamics, evolution, sustainability. *Books on Demand*, Norderstedt, Germany. 2007.
- CHA, H.S., PINGRY, D.E., THATCHEN, M.E. Managing the knowledge supply chain: an organizational learning model of information technology off shore outsourcing. *MIS Quarterly* Vol. 32 No. 2, pp. 281-306/June. 2008.
- COATES, V., FAROOQUE, M., KLAIVANS, R., LAPID, K., LINSTONE, H.A., PISTORIUS, C. & PORTER, A.L. On the future of technological forecasting. *Technological Forecasting and Social Change* Vol 67, n. 1, p. 1-17, 2001
- COELHO, G.M. *Prospecção tecnológica: metodologias e experiências nacionais e Internacionais*. Rio de Janeiro, Projeto CT-Petro, 2003. Disponível em: <<http://www.tendencias.int.gov.br/>>. Acesso em 05 de agosto de 2014.
- DAVIES, Stuart. Producing a forward plan, MGM Guidelines For Good Practice. Londres: *Museum and Galleries*, 1996.
- DE GEUS, A. P. Modeling to predict or to learn? In: MORECROFT, J. D. W; STERMAN, J. D. (Eds.) Modeling for learning organizations. Portland: *Productivity Press*, 1994. p. xii-xvi. (System Dynamics Series).
- DETOMBE, D.J. Co-operative Handling of Complex Interdisciplinary Societal Problems. In Guang zhong Liu, Kang-Hoh Phua, Jigang Ma, Juping Xu, Fuwen Gu & Changzheng He (Eds.) Optimization Technique and application, ICOTA '95, vol. 2. Chendu University of Science and Technology, Chengdu, China. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: *World Scientific*, pp. 1408-1416. 1995.
- EBERLEIN, R.L., CHICHAKLY, K.J., 2013. XMILE: a new standard for system dynamics. *System Dynamics Review* 29(3), 188-195
- GARCIA, M.L. and BRAY, O.H. Fundamentals of technology road mapping. Report SAND97-0665, *Sandia National Laboratories*. 1997.
- GLEICK, J. Chaos: making a new science. New York: *Viking*. 1987.
- HOWICKS, S., EDEN, C. On the nature of discontinuities in system dynamics modelling of disrupted project. *Journal of the Operational Research Society* 55, 598-605. 2004
- MENDONÇA, M. R. Bioenergia e viabilidade da produção de alimentos: para quem? *Revista Formação*, n. 15 volume 2. São Paulo, p. 189-226. 2007.
- MINIS, I., ZEIMPEKIS, V., DOUNIAS, G., AMPAZIS, N. Supply Chain Optimization, Design, and Management: Advances and Intelligent Methods. *IGI Global*, New York. 2010.
- MORECROFT, J. D. Strategic Modelling and Business Dynamics: A feedback systems approach. *John Wiley & Sons*, London. 2007.
- OLIVEIRA, A. U., 2009. *Os agrocombustíveis e os alimentos*. Disponível em: <[http://egal2009.easyplanners.info/area06/6194\\_OLIVEIRA\\_Arivaldo\\_Umbelino.doc](http://egal2009.easyplanners.info/area06/6194_OLIVEIRA_Arivaldo_Umbelino.doc)> acesso em: 05 de agosto de 2014.
- PHAAL, R., FARRUKH, C.J.P. & PROBERT, D.R. Technology roadmapping - A planning framework for evolution and revolution. *Technological Forecasting and Social Change* Vol 71, n. 1-2, p. 5-26, 2004
- PORTER, A. L., et al. Forecasting and management of technology, New York: *Wiley Interscience*, 1991.
- ROMME, A. G. L.; DAMEN, I. C. M. Toward science based design in organization development. *The Journal of Applied Behavioral Science*, v. 43, n. 1, p. 108-121. 2007.
- SARITAS, O. ONER, M.A. Systemic analysis of UK foresight results: joint application of integrated management model and road mapping. *Technological Forecasting and Social Change* 71 (1), p. 27-65, 2004.
- SENGE, P. M. A quinta disciplina. 12.ed. São Paulo: *Best Seller*, 1990. 351 p.
- SCHOEMAKER, P. J. H. Scenario Planning: a tool for strategic thinking. *Sloan Management Review*. Winter, 1995.
- WARREN, K., 2008. Strategic Management Dynamics. *John Wiley & Sons*, London.
- ZACKIEWICZ, M. SALLES-FILHO, S. Technological Foresight - Um instrumento para política científica e tecnológica, *Parcerias Estratégicas*, n.10, março, p. 144-161, 2001.